

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до самостійної роботи, практичних занять та виконання
розрахунково-графічного завдання
з дисципліни

«ТЕХНІЧНА МЕХАНІКА РІДИН І ГАЗІВ»

*(для студентів усіх форм навчання спеціальності
192 – Будівництво та цивільна інженерія, 263 – Цивільна безпека)*

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2017

Методичні рекомендації до самостійної роботи, практичних занять та виконання розрахунково-графічного завдання з дисципліни «Технічна механіка рідин і газів» (для студентів усіх форм навчання спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія, 263 – Цивільна безпека) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. О. В. Бобловський. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 23 с.

Укладач асистент О. В. Бобловський

Рецензент – доктор технічних наук, професор І. І. Капцов

*Рекомендовано кафедрою експлуатації газових і теплових систем,
протокол № 1 від 25.01.2016.*

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Методичні рекомендації до самостійної роботи	
з дисципліни «Технічна механіка рідин і газів».....	5
1.1 Роль навчальної дисципліни у підготовці фахівців.....	5
1.2 Змістові модулі, джерела і контрольні завдання.....	6
1.3 Засоби контролю.....	8
1.4 Критерії оцінювання знань.....	8
2 Методичні рекомендації до практичних занять та виконання	
розрахунково-графічного завдання з дисципліни	
«Технічна механіка рідин і газів».....	10
2.1 Загальна частина.....	10
2.2 Практичне заняття № 1.....	10
2.3 Практичне заняття № 2.....	12
2.4 Практичні заняття № 3, 4, 5.....	13
Варіанти завдань для розрахунково-графічної роботи.....	19
Список рекомендованої літератури.....	21
Додатки.....	21

Вступ

Це виробничо-практичне видання містить дві частини, у яких наведено методичні рекомендації до самостійної роботи студентів, до практичних занять та виконання розрахунково-графічного завдання.

Перша частина містить методичні рекомендації до самостійної роботи студентів з дисципліни «Технічна механіка рідин і газів».

Друга частина містить методичні рекомендації до практичних занять та виконання розрахунково-графічного завдання з дисципліни «Технічна механіка рідин та газів».

1 МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

З ДИСЦИПЛІНИ «ТЕХНІЧНА МЕХАНІКА РІДИН І ГАЗІВ»

1.1 Роль навчальної дисципліни у підготовці фахівців

Самостійна робота студентів полягає у формуванні професійних вмінь і навичок для прийняття самостійних рішень під час роботи в реальних умовах, виховання потреби в систематичному поновленні своїх знань та творчому їхньому застосуванні у практичній діяльності. Інформаційно-методичне забезпечення, пропоноване нижче, стане у пригоді для досягнення зазначеної мети.

Метою викладання навчальної дисципліни «Технічна механіка рідини і газу» є забезпечення єдиного комплексного підходу, системності і послідовності при одержанні потрібного і достатнього обсягу знань і вмінь відповідно до освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» із відповідної спеціальності.

Основними завданнями вивчення дисципліни «Технічна механіка рідини і газу» є оволодіння необхідним обсягом теоретичних і практичних знань із питань основ розрахунку трубопровідних споруд міст, теплогазопостачання і вентиляції будівель, котелень і пічних улаштувань, теплообмінних і газоочисних апаратів, для вирішення багатьох технічних питань у галузі санітарної техніки, виховання потреби систематичного поновлення своїх знань та творчого їх застосування у практичній діяльності.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні:

1. Знати: основні закони та рівняння гідромеханіки (статики і кінематики), теорію руху і рівноваги рідин (як крапельних, так газоподібних), їхню силову взаємодію з твердими тілами, прикладні закони руху рідини, теорії гідравлічних опорів, теорію трубопровідного транспорту, принципи роботи гідравлічних машин.

2. Вміти: виконувати гідравлічні розрахунки трубопроводів інженерних систем, розрахунки втрат тиску під час руху рідини і газу в мережах.

3. Мати компетентності щодо розрахунку втрат напору за різними методами.

Вивчення цієї дисципліни безпосередньо спирається на:

- фізику;
- вищу математику;
- теоретичну механіку.

На результати вивчення цієї дисципліни безпосередньо спираються:

- міські інженерні мережі;
- інженерне обладнання будівель;
- теплогазопостачання і вентиляцію.

1.2 Змістові модулі (ЗМ)

Модуль 1. Технічна механіка рідин і газів

Змістовий модуль 1 Гідростатика

Тема 1 Предмет технічної механіки рідини і газу

Тема 2 Основні фізичні властивості рідин і газів

Навчальні елементи: щільність рідини, в'язкість рідин, капілярні явища, аномальні рідини, ідеальна рідина.

Тема 3 Рівновага краплинних рідин

Навчальні елементи: рівноважний стан рідини і діючі сили, гідростатичний тиск у точці, загальні диференційні рівняння рівноваги рідини.

Тема 4 Рівновага краплинної рідини у полі земного тяжіння

Навчальні елементи: абсолютний і надмірний тиск, вакуум, закон Паскаля, тиск рідини на криволінійні поверхні, закон Архімеда.

Змістовий модуль 2 Гідродинаміка і динаміка газів

Тема 5 Рівняння енергії і теорема імпульсів

Навчальні елементи: основні поняття і визначення руху рідини, рівняння Бернуллі для елементарної струмки нестискаємої рідини, рівняння Бернуллі для потоку з поперечним перерізом кінцевих розмірів, рівняння Бернуллі для течії в'язкої рідини, гідрравлічний нахил, рівняння кінематики рідини. Методи Лагранжа, Ейлера, рівняння нерозривності, рівняння Бернуллі для газів.

Тема 6 Загальні відомості про гідрравлічні опори

Навчальні елементи: види гідрравлічних опорів, гідрравлічні опори і рух рідини в напірних трубопроводах, обробка інформації про гідрравлічні опори за допомогою критеріїв подібності.

Тема 7 Ламінарний і турбулентний рух рідини

Навчальні елементи: рівномірний рух рідини у відкритих руслах, число Рейнольдса, розподіл швидкостей по поперечному перерізу круглої труби при ламінарному русі, турбулентний рух рідини і газу в трубах, формула Дарсі.

Тема 8 Гідрравлічні розрахунки

Навчальні елементи: гідрравлічні розрахунки тиску водних і повітряних потоків на споруди, розрахунок простих трубопроводів, загальні формули для розрахунку втрат, розрахунок складних трубопроводів, гідрравлічний удар в трубах, розрахунок трубопроводів для транспортування газів, витікання газів з отворів.

1.3 Засоби контролю

Таблиця 1 – Види та засоби контролю змістових модулів

Види та засоби контролю	Розподіл балів, %
МОДУЛЬ 1. Поточний контроль зі змістових модулів	
ЗМ 1.1 Тестування. Тестування здійснюється після закінчення вивчення змістового модуля. Поточний контроль виконання РГЗ	35 %
ЗМ 1.2 Тестування. Тестування здійснюється після закінчення вивчення змістового модуля. Приймання РГЗ	35 %
Екзамен	30 %
Усього за модулем 1	100 %

1.4 Методи та критерії оцінювання знань

«Відмінно» – за національною шкалою; «А» (90 – 100 % набраних балів) за шкалою ECTS виставляється за таких умов:

1. Творчий підхід до засвоювання матеріалу, повнота і правильність виконання завдання.
2. Вміння застосовувати різні принципи й методи в конкретних ситуаціях.
3. Чітке, послідовне викладання відповіді на папері.
4. Уміння пов'язати теорію і практику.

«Добре» – за національною шкалою; «В» (82 – 89 % набраних балів), «С» (74 – 81 % набраних балів) за шкалою ECTS виставляється за таких умов:

1. Мають місце деякі неprincipові помилки несуттєвого характеру у викладанні відповідей за повних знань програмного матеріалу.
2. Переважання логічних підходів перед творчими у відповідях на питання.
3. Не завжди правильне прогнозування подій від прийнятих рішень.
4. Уміння пов'язати теорію з практикою.

«Задовільно» – за національною шкалою; **«D»** (64 – 73 % набраних балів), **«E»** (60 – 63 % балів) за шкалою ECTS виставляється за таких умов:

1. Репродуктивний підхід до засвоювання і викладання матеріалу.
2. Недостатня повнота викладання матеріалу.
3. Неглибокі знання основного матеріалу.
4. Нечітке викладання матеріалу на папері, порушення логічної послідовності.
5. Труднощі під час практичного втілення прийнятих рішень.

«Незадовільно з можливістю повторного оцінювання» – за національною шкалою; **«FX»** (35 – 59 % набраних балів) за шкалою ECTS виставляється за таких умов:

1. Відсутність знань із переважної частини матеріалу, погане засвоєння принципів положень курсу.
2. Наявність грубих, принципів помилок під час практичного виконання отриманих завдань.

«Незадовільно з обов'язковим повторним вивченням» – за національною шкалою; **«F»** (0 – 34 % набраних балів) за шкалою ECTS виставляється за таких умов:

1. Невиконання або виконання з великими помилками тих завдань, що пов'язані з розв'язанням практичних задач.
2. Неграмотне і неправильне викладання відповідей на папері.

2 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ ТА ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОГО ЗАВДАННЯ З ДИСЦИПЛІНИ «ТЕХНІЧНА МЕХАНІКА РІДИН І ГАЗІВ»

2.1 Загальна частина

Метою практичних занять є закріплення знань із дисципліни «Технічна механіка рідин та газів». Виконуючи завдання на практичних заняттях, студенти набувають досвід розрахунків процесів, які відбуваються у газах та рідинах у техніці, навчаються розраховувати та підбирати насоси та вентилятори, розраховувати втрати тиску у каналах під час руху рідини.

2.2 Практичне заняття № 1 Властивості рідини

Стискальність краплинних рідин під дією тиску характеризується коефіцієнтом об'ємного стискання β_ω , що становить відносну зміну об'єму рідини на одиницю зміни тиску:

$$\beta_\omega = -\frac{1}{W_0} \cdot \frac{\Delta W}{\Delta p}, \quad (1)$$

де W_0 – початковий об'єм рідини;

ΔW – зміна цього об'єму у разі збільшення тиску на величину Δp .

Коефіцієнт об'ємного стискання в системі СІ має розмірність Па^{-1} .

Знак мінус у формулі (1) обумовлений тим, що позитивному збільшенню тиску p відповідає негативне збільшення (тобто зменшення) обсягу рідини.

Температурне розширення краплинних рідин характеризується коефіцієнтом температурного розширення β_t , що виражає відносне збільшення об'єму рідини у разі збільшення температури на 10°C , тобто

$$\beta_t = \frac{1}{W_0} \frac{\Delta W}{\Delta T}, \quad (2)$$

де W_0 – початковий об'єм рідини;

ΔW – зміна цього об'єму у разі підвищення температури на величину ΔT .

Для ідеальних газів справедливе рівняння Клапейрона, що дозволяє визначати щільність газу за відомих тиску і температури, тобто

$$\rho = \frac{p}{RT}, \quad (3)$$

де p – абсолютний тиск; R – питома газова постійна, різна для різних газів, але незалежна від температури і тиску (для повітря $R = 287$ Дж/(кг·К)); T – абсолютна температура.

Щільність повітря за $R = 287$ Дж/(кг·К) у стандартних умовах за формулою (3) буде дорівнювати $\rho = 1,2$ кг/м³.

Щільність повітря за інших умов (ρ) визначають за формулою:

$$\rho = \rho_0 \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T}, \quad (4)$$

де ρ_0 , T_0 , – початкова щільність та температура газу, кг/м³.

Для порівняння величин, які характеризують системи в однакових умовах, вводяться поняття: «нормальні фізичні умови» (н. ф. у.), «нормальні технічні умови» (н. т. у.), «нормальні умови» (н. у.).

Н. ф. у. – $p = 101,325$ кПа (760 мм рт. ст.); $T = 273,16$ К.

Н. т. у. – $p = 98$ кПа (735,6 мм рт. ст.); $T = 288,16$ К.

Н. у. – $p = 101,325$ кПа (760 мм рт. ст.); $T = 293,16$ К.

Задача

Визначити коефіцієнт об'ємного стискання β_ω , якщо відомо, що початковий об'єм $W_0 = 5$ м³, зростання тиску у процесі складає $\Delta p = 12$ кПа, а зміна об'єму складає $W = 0,05$ м³.

Приклад розв'язання:

Використовуємо формулу (1), тоді:

$$\beta_\omega = -\frac{1}{W_0} \cdot \frac{\Delta W}{\Delta p} = -\frac{1}{5} \cdot \frac{0,05}{12000} = 8,33 \cdot 10^{-7} \text{ Па}^{-1}.$$

2.3 Практичне заняття № 2

Число Рейнольдса

Грунтуючись на деяких теоретичних міркуваннях, а також на результатах дослідів, Рейнольдс установив загальні умови, за яких можливі існування ламінарного і турбулентного режимів руху рідини і перехід від одного режиму до іншого. Виявилось, що стан (режим) потоку рідини в трубі залежить від величини безрозмірного числа, яке враховує основні фактори, що визначають цей рух: середню швидкість v , діаметр труби d , щільність рідини ρ і її абсолютну в'язкість μ . Це число (пізніше йому була присвоєна назва числа Рейнольдса) має вигляд:

$$Re = \frac{vd\rho}{\mu} = \frac{vd}{\nu} . \quad (10)$$

Величина d у числі Рейнольдса може бути замінена будь-яким лінійним параметром, пов'язаним з умовами течії чи обтікання (діаметр труби, діаметр падаючої в рідині кулі, довжина обтічної рідиною пластинки та ін.)

Значення числа Рейнольдса, за якого відбувається перехід від ламінарного руху до турбулентного, називають критичним числом Рейнольдса і позначають $Re_{кр}$.

За $Re > Re_{кр}$ режим руху є турбулентним, за $Re < Re_{кр}$ — ламінарним. Величина критичного числа Рейнольдса залежить від умов входу в трубу, шорсткості її стінок, відсутності чи наявності первісних збурювань у рідині, конвекційних струмів та ін.

Питання про нестійкість ламінарного руху і його перехід у турбулентний, а також про величину критичного числа Рейнольдса ретельно теоретично й експериментально вивчалось, але й досі не одержало повного вирішення.

Задача

Визначити число Рейнольдса для холодної води ($t = 20^{\circ}\text{C}$), яка рухається у трубопроводі діаметром 200 мм, якщо витрата води дорівнює $12 \text{ м}^3/\text{год}$.

Приклад розв'язання:

Переводимо м³/год у м³/с: $12/3600 = 0,0033 \text{ м}^3/\text{с}$.

Розраховуємо площу труби: $F = (\pi \cdot 0,2^2/4) = 0,0314 \text{ м}^2$.

Розраховуємо швидкість води: $v = 0,0033/0,0314 = 0,105 \text{ м/с}$.

При $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $\nu = 1,006 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

$Re = 0,105 \cdot 0,2/1,006 \cdot 10^{-6} = 19811 > 10000$ – режим турбулентний.

2.4 Практичні заняття № 3, 4, 5

Втрати напору на тертя за рівномірного руху рідини в трубах

Використаємо метод розмірності для визначення втрат напору на тертя, що виникають при рівномірному напірному русі рідини в трубах.

Досліди показують, що величина втрат напору на тертя $h_{\text{тр}}$ під час руху рідини в трубах може залежати від таких факторів:

- діаметра труби d і її довжини l ;
- фізичних властивостей рідини (щільності ρ і в'язкості μ);
- середньої швидкості руху в трубі v ;
- середньої висоти виступів шорсткості k на стінках труби.

Напишемо функціональну залежність у вигляді

$$\Delta p_{\text{тр}} = f(v, d, \mu, \rho, k, l), \quad (11)$$

де $\Delta p_{\text{тр}}$ — втрати тиску на довжині потоку, яка дорівнює l , зв'язані з втратою напору формулою

$$\Delta p_{\text{тр}} = \rho g h_{\text{тр}}. \quad (12)$$

Вид функції f у рівнянні (11) невідомий.

Перепишемо рівняння (11) у вигляді

$$f_l \left(\frac{\Delta p_{\text{тр}}}{l}, \mu, \rho, d, v, k \right) = 0, \quad (13)$$

враховуючи, що втрата на тертя завжди прямо пропорційна довжині розглянутої ділянки.

Для виміру вхідних у формулу (13) $n = 6$ величин вимагаються $m = 3$ основні одиниці: маса, час і довжина.

Рівняння (13) може бути подане у формі, що містить $n - m = 3$ безрозмірних відносин (чисел Пі відповідно до Пі-теорему), тобто замість (13) можна записати

$$f_2 (\pi_1, \pi_2, \pi_3) = 0, \quad (14)$$

де π_1, π_2, π_3 – безрозмірні комплекси.

Для визначення чисел π_1, π_2, π_3 виберемо з усіх змінних три (по числу основних одиниць виміру), що включають всі основні одиниці виміру, наприклад v, d і ρ . Складемо тепер рівняння розмірностей, що поєднують обрані змінні з кожною з інших змінних по черзі, тобто

$$\pi_1 = d^{x_1} v^{y_1} \rho^{z_1} \mu; \quad (15)$$

$$\pi_2 = d^{x_2} v^{y_2} \rho^{z_2} \frac{\Delta p_{\text{тр}}}{l}; \quad (16)$$

$$\pi_3 = d^{x_3} v^{y_3} \rho^{z_3} k. \quad (17)$$

У виразах для π_1, π_2, π_3 потрібно підібрати показники за d, v і ρ так, щоб числа π не мали розмірності.

Неважко показати (перевіривши розмірності), що

$$\pi_1 = \frac{vd\rho}{\mu}; \quad (18)$$

$$\pi_2 = \frac{d \frac{\Delta p_{\text{тр}}}{l}}{v^2 \rho}; \quad (19)$$

$$\pi_3 = \frac{k}{d}. \quad (20)$$

Зокрема, для числа π_3 і з умови однорідності розмірностей одержуємо $L^{x_3} (LT^{-1})^{y_3} (ML^{-3})^{z_3} L = L^0 T^0 M^0$.

Звідси випливають такі рівняння:

$$\text{за } L: x_3 + y_3 - 3z_3 + 1 = 0$$

$$\text{за } T: -y_3 = 0,$$

$$\text{за } M: z_3 = 0, \text{ тобто } x_3 = -1 \text{ і } \pi_3 = k/d.$$

Підставляючи (18) – (20) у (14), маємо

$$f_2 \left(\frac{vd\rho}{\mu}; \frac{\frac{\Delta p_{\text{тр}}}{1} d}{v^2 \rho}; \frac{k}{d} \right) = 0.$$

Вирішуємо це рівняння відносно π_2 :

$$\frac{d \frac{\Delta p_{\text{тр}}}{1}}{v^2 \rho} = \varphi \left(\frac{vd\rho}{\mu}; \frac{k}{d} \right)$$

або

$$\Delta p_{\text{тр}} = \frac{v^2 \rho l}{d} \varphi \left(\frac{vd\rho}{\mu}; \frac{k}{d} \right). \quad (21)$$

З огляду на формулу (11) маємо,

$$h_{\text{тр}} = \frac{\Delta p_{\text{тр}}}{\rho g} = \frac{v^2 l}{gd} \varphi \left(\frac{vd\rho}{\mu}; \frac{k}{d} \right)$$

чи, позначивши

$$\varphi \left(\frac{vd\rho}{\mu}; \frac{k}{d} \right) = \frac{\lambda}{2}, \quad (22)$$

де λ – безрозмірне число, мова про яке буде йти нижче, остаточно одержимо

$$h_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}. \quad (23)$$

З формули (23) випливає, що втрата напору на тертя під час руху рідини в трубі зростає зі збільшенням середньої швидкості потоку і довжини розглянутої ділянки труби і обернено пропорційна її діаметру. Крім того, у формулу (23) входить невідомий безрозмірний коефіцієнт λ – так званий коефіцієнт гідравлічного тертя. Ця формула була отримана в XIX ст. емпіричним шляхом і називається *формулою Дарсі – Вейсбаха*.

Наведений метод можна використовувати також для визначення виду формули втрат напору на місцеві опори. У цьому разі, враховуючи, що місцеві втрати практично не залежать ні від довжини ділянки труби, ні від її діаметра, неважко одержати формулу

$$h_{\text{м}} = \zeta \frac{v_2^2}{2g}, \quad (24)$$

де ζ – безрозмірний коефіцієнт, так званий коефіцієнт місцевих втрат;

v_2 – швидкість потоку після проходження через місцевий опір.

Формулу (24), отриману емпіричним шляхом, яка є *формулою Вейсбаха*.

Втрати напору на тертя в круглій трубі

Знайдемо втрати напору на тертя під час ламінарного руху рідини в круглій трубі.

Із урахуванням $v_{\text{нб}} = \frac{Q}{\omega} = \frac{\pi \gamma i r^4}{8 \mu \pi r^2} = \frac{\gamma i}{8 \mu} r^2$ можна одержати вираз для гідравлічного ухилу у вигляді

$$i = \frac{8 \mu v_{\text{cp}}}{\gamma r^2} = \frac{32 \mu}{\gamma d^2} v_{\text{cp}}$$

або

$$h_{\text{тр}} = i l = \frac{32 \mu l v_{\text{cp}}}{\gamma d^2} . \quad (25)$$

Замінюючи абсолютну в'язкість μ через кінематичну ν , одержуємо формулу, названу *формулою Пуазейля — Гагена*, для втрат напору під час ламінарного руху:

$$h_{\text{тр}} = \frac{32 \nu l v_{\text{cp}}}{g d^2} . \quad (26)$$

Ця формула показує, що втрати напору на тертя за ламінарного режиму пропорційні середній швидкості руху. Ці втрати не залежать від стану внутрішньої поверхні стінок труби, тому що характеристика стану стінок у формулу (26) не входить. Відсутність впливу стінок на опір можна пояснити тим, що рідина прилипає до стінок, у результаті чого відбувається тертя рідини об рідину, а не рідини об стінку.

Зіставляючи формулу (26) із загальною залежністю для втрат напору на тертя, що має вигляд

$$h_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} ,$$

знайдемо

$$\lambda = \frac{64 \nu}{v d} = \frac{64}{\text{Re}} . \quad (27)$$

Звідси випливає, що за ламінарного режиму коефіцієнт гідравлічного тертя обернено пропорційний числу Рейнольдса.

Отримані залежності з великою точністю підтверджуються численними дослідями руху різних рідин в умовах ламінарного режиму. Тим самим знаходять підтвердження і зроблені в процесі висновків цих залежностей

допущення про застосовність закону Ньютона для ламінарного руху і про те, що швидкість біля стінки дорівнює нулю. В інженерній практиці з ламінарним режимом часто доводиться зіштовхуватися під час руху в трубах рідин із підвищеною в'язкістю (нафта, гас, мастила та ін.).

Із формули (26) видно, що втрати напору за ламінарного режиму прямо пропорційні в'язкості рідини. Тому іноді для підвищення пропускної здатності нафтопроводів нафту в холодну погоду підігрівають, завдяки чому зменшується її в'язкість, а отже, і втрати напору. Отримані залежності вимагають внесення в них виправлень при рухах зі значним теплообміном, тобто у випадках, якщо рух рідини супроводжується її нагріванням чи охолодженням.

Часто замість гідравлічного радіуса використовують так званий еквівалентний (чи гідравлічний) діаметр

$$d_{\text{екв}} = 4R = 4 \frac{\omega}{\chi}.$$

Нагадаємо, що для круглих труб еквівалентний діаметр дорівнює їхньому геометричному діаметру: $d_{\text{екв}} = d$.

Замінюючи у формулі Дарсі для втрати напору діаметр гідравлічним радіусом чи еквівалентним діаметром, одержуємо вираз

$$h_{\text{тр}} = \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{v^2}{2g} = \lambda \frac{1}{d_{\text{екв}}} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (28)$$

який принципово придатний для розрахунку труб будь-якого поперечного перерізу.

Однак у формулі (28) коефіцієнт λ залежить уже не тільки від числа Рейнольдса, але і від форми перерізу труби.

За ламінарного руху коефіцієнт λ у трубах некругового перерізу значно зростає порівняно з рухом у круглій трубі (за того самого числа Рейнольдса) і може бути виражений формулою:

$$\lambda = \frac{A}{\text{Re}_{\Pi}}, \quad (29)$$

де Re_{Π} – число Рейнольдса, обчислене за еквівалентним діаметром;

$$\text{Re}_{\Pi} = \frac{4vR}{\nu} = \frac{vd_{\text{екв}}}{\nu},$$

A – коефіцієнт форми, значення якого залежать від форми перерізу.

Для гідравлічногладеньких труб велике поширення одержала формула Блазіуса, а для цілком шорсткуватих труб – формула Б. Л. Шифрінсона [1–3].

Задача

Визначити втрати тиску у трубопроводі діаметром $d = 0,9$ м, за витрати рідини $G=0,001$ м³/с за умови, що труби сталеві нові (див. рис. 1).

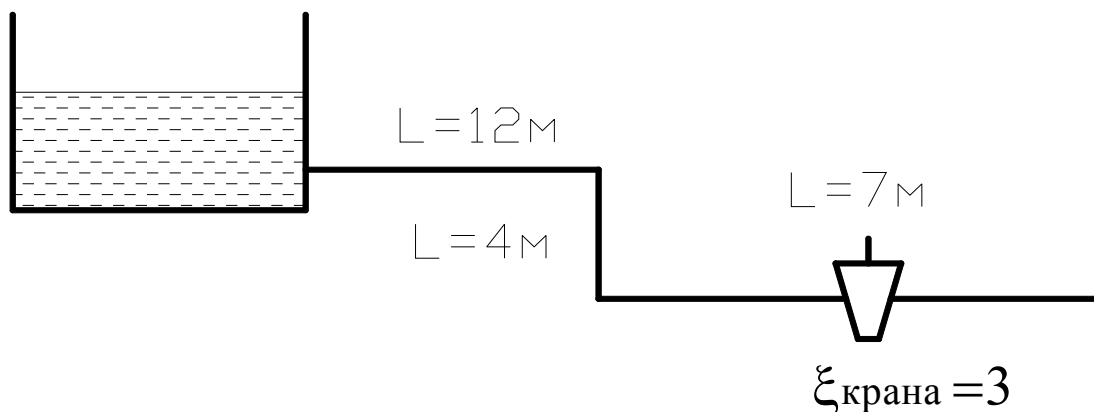


Рисунок 1 – Конструктивна схема

Приклад розв’язання:

Розраховуємо швидкість $v = G/F$, м/с, $v = 0,001/(\pi \cdot 0,9^2/4) = 0,0016$ м/с.

Використовуємо формулу $Re = vd/\nu = 0,0016 \cdot 0,9/(1,006 \cdot 10^{-6}) = 1431$ – режим руху – ламінарний.

Для визначення коефіцієнта гідравлічного тертя використовуємо формулу (27):

$$\lambda = \frac{64}{Re} = \frac{64}{1431} = 0,045;$$

$$\text{Витрати тиску на тертя: } h_{\text{тр}} = \lambda \frac{\ell}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0,045 \frac{23}{0,9} \frac{0,0016^2}{2 \cdot 9,81} = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ кгс/м}^2.$$

Для визначення витрат тиску на місцеві опори (коефіцієнти місцевого опору: коліно 1,1; вхід 0,5):

$$h_i = \sum \zeta \left(\frac{v^2}{2g} \right) = (3 + 1,1 + 1,1 + 0,5) \frac{0,0016^2}{2 \cdot 9,81} = 7,4 \cdot 10^{-7} \text{ кгс/м}^2.$$

$$\text{Втрати тиску } \Delta P = (1,5 + 7,4) \cdot 10^{-7} = 8,9 \cdot 10^{-7} \text{ кгс/м}^2.$$

Таблиця 2 – Варіанти завдань на розрахунково-графічну роботу

Варіант	l_1 , м	l_2 , м	l_3 , м	l_4 , м	l_5 , м	l_6 , м	l_7 , м	l_{7a} , м	l_8 , м	Кількість людей у приміщенні			
										пом. 1	пом. 2	пом. 3	пом. 4
1	5	3	4	5	7	12	10	11	12	10	5	7	11
2	6	5	6	5	6	15	9	16	11	9	6	8	11
3	7	7	8	5	4	11	7	13	13	8	7	9	10
4	8	2	3	5	3	9	12	15	11	7	8	7	10
5	3	6	4	5	7	11	15	12	12	11	5	8	12
6	4	4	9	5	8	13	11	17	11	10	5	9	12
7	5	3	4	5	7	12	13	18	13	10	5	7	11
8	5	5	6	5	6	15	14	16	11	9	6	8	11
9	6	7	8	5	4	11	10	14	12	8	6	9	10
10	7	2	3	5	3	9	9	12	11	7	6	7	10
11	8	6	4	5	7	11	7	9	13	11	7	8	12
12	3	4	9	5	8	13	12	10	11	10	7	9	12
13	4	3	4	5	7	12	15	11	12	10	5	7	11
14	5	5	6	5	6	15	11	16	11	9	6	8	11
15	6	7	8	5	4	11	13	13	13	8	7	9	10
16	7	2	3	5	3	9	14	15	11	7	8	7	10
17	8	6	4	5	7	11	10	12	12	11	5	8	12
18	3	4	9	5	8	13	9	17	11	10	5	9	12
19	4	3	4	5	7	12	7	18	13	10	5	7	11
20	5	5	6	5	6	15	12	16	11	9	6	8	11
21	6	7	8	5	4	11	15	14	12	8	6	9	10
22	7	2	3	5	3	9	11	12	11	7	6	7	10
23	8	6	4	5	7	11	13	9	13	11	7	8	12
24	3	4	9	5	8	13	14	10	11	10	7	9	12

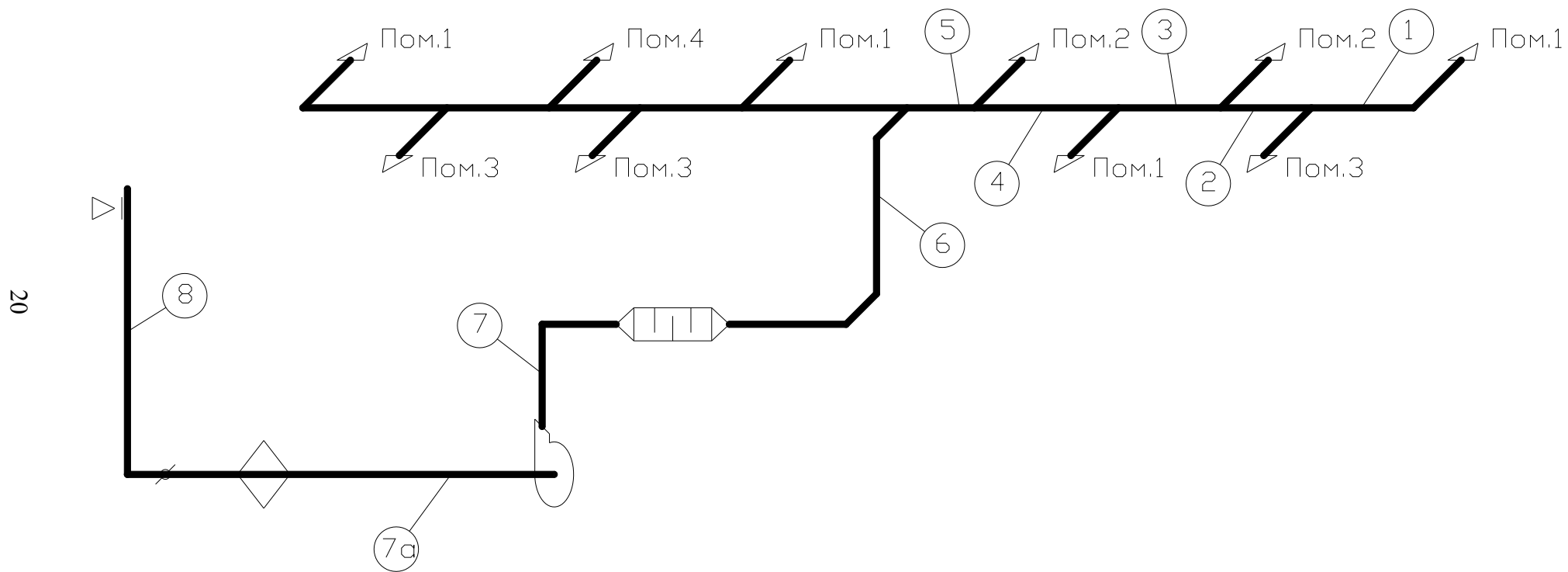


Рисунок 2 – Конструктивна схема системи вентиляції

Список рекомендованої літератури

1. Шушляков Д. О. Технічна механіка рідин і газів / Д. О. Шушляков. – Харків. : ХНАМГ, 2006. – 78 с.
2. Альтшуль А. Д. Гидравлика и аэродинамика / А. Д. Альтшуль, П. Г. Киселев. – М. : Госстройиздат, 1965. – 275 с.
3. Альтшуль А. Д. Гидравлические сопротивления трубопроводов / А. Д. Альтшуль, В. И. Калицун. – М., 1982. – 224 с.

Додаток А

Таблиця А.1 – Зв'язок одиниць тиску в системі СІ з деякими іншими системами виміру

Одиниці тиску	Па	бар	кгс/м ²	кгс/см ²	мм рт. ст.	мм вод. ст.
Па	1	10 ⁻⁵	0,1	~10 ⁻⁵	0,0075	~0,1
бар	10 ⁵	1	~10 ⁶	~1	~750	~10200
кгс/м ²	~10	~10 ⁻⁶	1	~10 ⁻⁴	0,0735	~1
кгс/см ²	~10 ⁵	~1	10 ⁴	1	~735	10 ⁴
мм рт. ст.	133,3	1,33*10 ⁻³	~13,6	1,36*10 ⁻³	1	13,6
мм вод. ст.	~10	10 ⁻⁴	~1	10 ⁻⁴	0,0735	1

Таблиця А.2 – Теплофізичні параметри води

t, °	ρ, кгс/см ²	γ, кгс/м ³	c _p , кДж/(кг К)	λ·10 ⁻² , Вт/(м К)	α·10 ⁻⁸ , м ² /с	ν·10 ⁻⁶ , м ² /с	Pr
0	1,033	999,9	4,217	0,5610	13,1	1,789	13,67
10	1,033	999,7	4,193	0,5800	13,7	1,306	9,52
20	1,033	998,2	4,182	0,5984	14,3	1,006	7,02
30	1,033	995,7	4,179	0,6154	14,9	0,805	5,42
40	1,033	992,2	4,179	0,6305	15,3	0,659	4,31
50	1,033	988,1	4,182	0,6435	15,7	0,556	3,54
60	1,033	983,2	4,185	0,6543	16,0	0,478	2,98
70	1,033	977,8	4,190	0,6631	16,3	0,415	2,55
80	1,033	971,8	4,197	0,6700	16,6	0,365	2,21
90	1,033	965,3	4,205	0,6753	16,8	0,326	1,95
100	1,033	958,4	4,216	0,6791	16,9	0,295	1,75
110	1,459	951,0	4,233	0,6850	17,0	0,272	1,60
120	2,02	943,1	4,240	0,6860	17,1	0,252	1,47

Таблиця А.3 – Кінематична і динамічна в'язкість деяких краплинних рідин
(при $t = 20^{\circ}\text{C}$)

Рідина	μ , Па·с	ν м ² /с
Гліцерин безводний	0,512	0,0041
Гас (при 15 °С)	0,0016 - 0,0025	0,000002 - 0,000003
Бензин (при 15 °С)	0,0006 - 0,00065	0,00000083 - 0,00000093
Олія касторова	0,972	0,01002
Олія мінеральна	0,0275 - 1,29	0,0000313 - 0,0145
Нафта при 15 °С ($\delta_4^{15} = 0,86$)	0,007 - 0,008	0,0000081 - 0,0000093
Ртуть	0,0015	0,000000111
Спирт етиловий безводний	0,00119	0,00000151

Таблиця А.4 – Значення кінематичної в'язкості ν і питомої газової постійної R
для деяких газів

Газ	ν , м ² /с при температурі в °С				R , Дж/(кг·К)
	0	20	50	100	
Повітря	0,0000133	0,0000151	0,0000178	0,0000232	287
Метан	0,0000145	0,0000165	0,0000197	0,0000256	520
Етилен	0,000075	0,0000086	0,0000104	0,0000138	296

Таблиця А.5 – Значення коефіцієнта об'ємного стискання води
при різних температурах і тисках

t , °С	β_w , Па ⁻¹ при тисках у Па·10 ⁴				
	50	100	200	390	780
0	0,054	0,0537	0,0531	0,0523	0,0515
5	0,0529	0,0523	0,0518	0,0508	0,0493
10	0,0523	0,0518	0,0508	0,0498	0,0481
15	0,0518	0,051	0,0503	0,0488	0,047
20	0,0515	0,0505	0,0495	0,0481	0,046

Виробничо-практичне видання

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до самостійної роботи, практичних занять та виконання
розрахунково-графічного завдання
з дисципліни

«ТЕХНІЧНА МЕХАНІКА РІДИН І ГАЗІВ»

*(для студентів усіх форм навчання спеціальності
192 – Будівництво та цивільна інженерія, 263 – Цивільна безпека)*

Укладач **БОБЛОВСЬКИЙ** Олександр Володимирович

Відповідальний за випуск *Р. Б. Ткаченко*

Редактор *О. В. Михайленко*

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2016, поз. 160 М

Підп. до друку 23.10.2017. Формат 60 x 84/16.
Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 1,0
Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК 5328 від 11.04.2017.